

## 레일-휠의 접촉면 경사도에 따른 응력-변위량의 거동특성에 관한 연구

### A Study on the Contact Behavior of Stress-Displacement Characteristics for an Inclined Rail-Wheel Contact Mode

김청균<sup>1</sup>

Chung Kyun Kim

#### Abstract

Using the finite element method, rail-wheel contact model has been analyzed for mechanical loads due to passengers and payload of the train. This paper presents an investigation on how tapered wheel and inclined rail surfaces affect the contact stress and displacement of rail-wheel contacting surface under mechanical loads. For a numerical analysis, the tapered faces of the wheel are considered as 2.5% and 5.5%. And two models of the tilted rail are also considered as 40:1 and 20:1 at the bottom of the rail. The computed results based on the contact stress and displacement FE analysis indicate that the tilting ratio of the rail, 20:1 with a tapered face of the wheel, 2.5% may be more stable compared to that of 40:1 tilting model and 5.5% tapered wheel face.

**Keywords** : Contact Stress(접촉응력), Displacement(변위량), Rail(레일), Wheel(휠)

#### 1. 서론

정상적으로 운행하는 철도차량에서 레일과 휠 사이에는 차량의 자중량, 승객 또는 화물의 하중, 속도에 의한 관성력, 제동작용에 의한 마찰력 등이 작용하고, 이들 하중에 의해 레일과 휠에서는 마찰열, 마멸, 소음과 진동, 파괴와 같은 물리적 현상들이 일어난다. 레일과 휠 사이의 접촉거동 특성에 따라서 철도차량은 안전성과 운전성에서 큰 영향을 받게되고, 동시에 차량의 유지·보수비에 연계되어 있기 때문에 철도차량의 설계에서 중요하게 다루고 있다.

따라서 레일-휠의 접촉거동 문제도 철도차량의 안전운행과 수명연장, 유지보수 측면에서 외국에서는 많은 연구를 진행하고 있으나, 국내에서는 중요성에 대한 인식을 하는 정도로 그치고 있다. 오래 전부터 레일의 구름 마찰면에서 발생하는 마멸문제를 해결하기 위해서 특히 레일의 표면하중에서 발생하는 변형거동 특성을 소재에 연계한 연구를 많이 수행하였다[1,2]. 철도는 산업화 운송수단의 첨병으로 세계2차 대전을 전후하여 급속한 기술개발이 진행되었다. 그 결과로 레일과 휠의 접촉 형상에 대한 연구도

많이 진행되었고, 차량의 고속화는 레일과 휠의 형상설계에 대한 최적화 기술이 적용되어 현재의 고속전철까지 급속하게 발전하였다. 특히, 최근에는 차량의 축하중과 마찰에 의해 발생하는 저항력, 마찰에 의해 발생하는 열하중도 동시에 고려한 접촉응력의 계량화 필요성을 강조한 연구나, 레일과 휠의 실제 접촉점이 이동함에 따라 발생하는 파손 기준에 대한 연구의 필요성도 제기되었다[3].

미국의 철도기준협회(AAR)는 레일-휠의 설계에 대한 해석적 평가 기준을 1983년에 제정하였으나, 레일-휠의 접촉응력 조건을 단지 탄성범위로 한정된 것으로 철도차량의 고속화에 따른 다양한 하중조건에 대한 설명이 아직은 부족하다[4]. 레일에 기계적 하중만 작용하는 경우에 3차원 모델링 해석을 레일과 휠의 전체 모델에 대해 수행함으로써 레일-휠의 접촉거동 및 강도에 대한 유한요소해석을 수행하였다[5-6]. 또한, 휠이 이동함에 따라 변하는 레일과 휠의 실제 접촉점을 고려한 접촉응력을 트라이볼로지적 관점에서 유한요소해석을 적용한 연구도 있다[7].

그러나 이들 연구의 대부분은 레일과 휠의 접촉면이 실제로 접촉하는 기울기 형상을 부분적으로 반영한 결과로 그동안 논의된 레일-휠 사이의 일정한 경사도에 대한 상대적 비

<sup>1</sup> 정회원, 홍익대학교 기계시스템디자인공학과, 교수

교 데이터가 적극적으로 반영되지 못한 아쉬움이 있었다.

따라서, 본 연구에서는 레일과 휠의 축에 가해진 기계적 하중이 레일-휠의 구름마찰 표면의 기울기에 따라 변하는 접촉거동 특성을 접촉응력과 변위량 측면에서 수치적으로 해석하고자 한다. 이것은 철도차량의 안전운행과 밀접한 관련성이 있는 것으로 기존의 레일과 휠 사이에 어떠한 경사도를 유지하는 것이 바람직한가에 대한 수치적 결과를 설계 측면에서 제공하고자 한다.

## 2. 해석조건 및 해석모델

### 2.1 해석조건

레일과 휠의 접촉거동 특성에 가장 큰 영향을 미치는 하중에는 다음과 같은 것들이 있다.

- 레일의 상단부에 수직으로 작용하는 차량과 적재량에 의한 총합 하중
- 휠의 플랜지가 레일의 측면부에 마찰 접촉을 하면서 발생하는 측면부 하중
- 휠 회전에 따라 발생하는 5~6% 정도의 원심력[8]
- 휠과 레일 사이에서 발생하는 마찰 저항력 등

철도차량의 회전축에 가해지는 차축당 17,000kg의 하중은 대단히 크기 때문에 레일과 레일을 받치고 있는 침목을 중심으로 모든 하중을 적절히 분산시켜야 레일-휠 접촉 시스템은 안전성과 내구성을 확보할 수 있다.

본 연구에서 레일과 휠 사이의 접촉거동 문제를 해석하기 위하여, 정상적으로 이동하는 차량은 직선 레일에서 발생하는 접촉응력이 레일의 정상부에서 가장 클 것이라는 가정하에 해석하였다. 그러나 곡선레일을 주행하는 경우는 레일의 곡률반경과 주행속도에 따라 실제의 접촉점이 이동한다. 즉, 레일과 휠의 실제 접촉면 위치는 휠의 경사면 기울기에 따라서 크게 변한다는 사실을 고려하여 해석하였다.

### 2.2 해석모델

레일과 휠 사이의 접촉 경사도에 따라 접촉면에서 발생하는 응력과 변위량에 대한 연구를 수행하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 1에서 보여준 기울기 모델을 고려하였다. 즉, 접촉면 경사도  $\alpha=20:1(=2.8624^\circ)$ 과  $40:1(=1.4429^\circ)$ 인 경우와 휠 표면의 기울기가 2.5%, 5.5%인 두 가지 경우에 대하여 유한요소해석을 수행하였다.

레일과 휠의 소재는 잘 알려진 UIC 60와 NF F01 133을 사용하였고, 사용된 레일-휠의 접촉 모델의 유한요소해석 메쉬를 Fig. 2에서 보여주고 있다. 유한요소해석 모델의 생성과 수치적 계산은 접촉조건 해석에서 신뢰성이 검증된

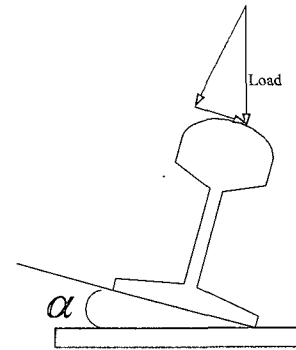


Fig. 1. Tilting angle of the rail

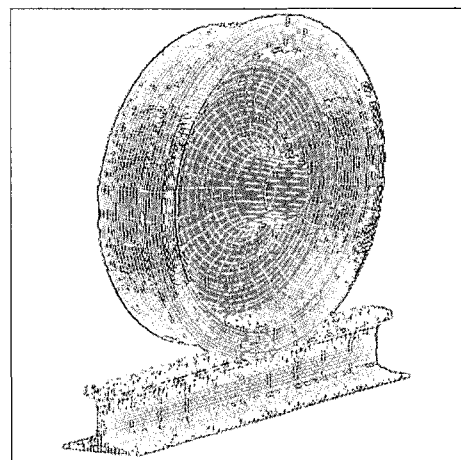


Fig. 2. FE analysis model

MENTAT/MARC 프로그램을 사용하였다[9]. 여기서 사용한 휠과 레일의 소재인 UIC 60의 탄성계수는 210GPa이고, 밀도는  $7850\text{kg/m}^3$ 이며, 포아송비는 0.3으로 주어진다.

## 3. 해석결과

### 3.1 접촉응력

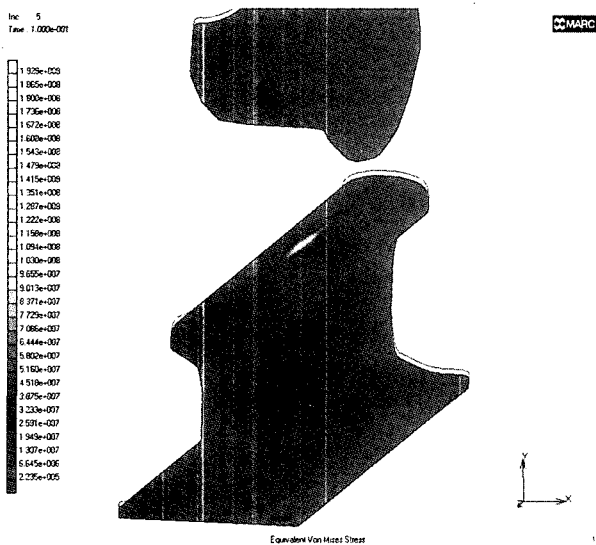
Fig. 3에 대한 해석모델은 Fig. 1에서 보여준 레일의 경사도가 20:1이고, 휠의 마찰 표면 기울기가 2.5%일 때 레일과 휠의 구름마찰 표면에서 발생한 von Mises 응력분포를 보여주고 있다. Fig. 3(a)에서 보여준 것처럼 레일의 정상부를 중심으로 발생한 von Mises 응력은 레일의 길이 방향으로 길게 분포한다. 또한 레일과 휠의 접촉점에서 제시한 응력은 Fig. 3(b)에서 알 수 있듯이 레일-휠의 접촉점에서 크게 집중되고 있음을 알 수 있다. Fig. 3에서 레일의 정상부에 걸리는 응력은 193MPa이지만, 휠의 마찰 접촉면에는 상대적으로 작은 126MPa가 발생하였다. 이것은 휠보다는 레일에 응력이 53%나 더 걸린다는 것이다. 따라서 레일의 강도를 확보

다 높게 설계하여 레일과 휠의 강도 안전성을 유사하게 맞추는 최적화 설계에서 필요한 데이터이다.

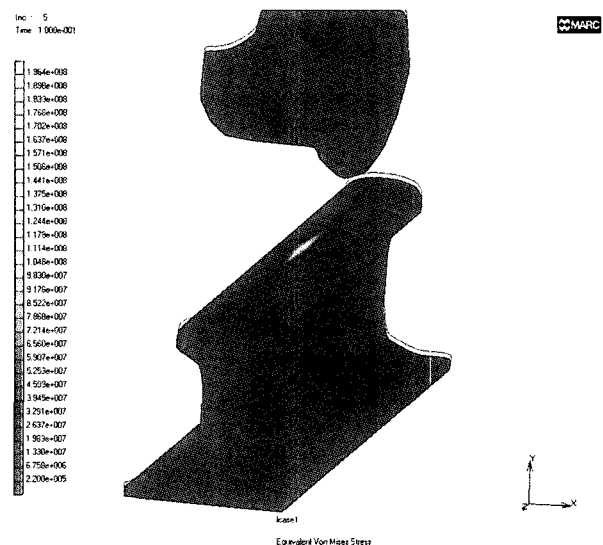
레일의 경사 기울기가 20:1로 Fig. 3의 경우와 같지만, 휠의 접촉 표면 기울기를 5.5%로 증가시켰을 때 레일과 휠의 접촉면에서 발생하는 von Mises 응력분포를 Fig. 4에서 보여주고 있다. 즉, 레일에서 발생한 von Mises 응력은 레일의 접촉면을 따라서 길이방향으로는 길게, 그리고 좌우방향으로는 비교적 좁게 발생하였다. 이와 같은 응력분포 패턴은 휠의 접촉표면에서도 대단히 유사하여 휠의 폭 방향으로

좁지만, 원주 방향으로로는 길게 발생하였다. Fig. 4의 해석결과에 의하면, 레일의 접촉면에서 von Mises 응력은 298MPa로 높은 접촉응력이 국부적으로 발생하고 휠에서는 193MPa의 낮은 응력이 발생하였다. 여기서도 레일이 휠 구조물에 비하여 54%나 높은 von Mises 응력이 걸리는 경향은 2.5%의 경우와 같다.

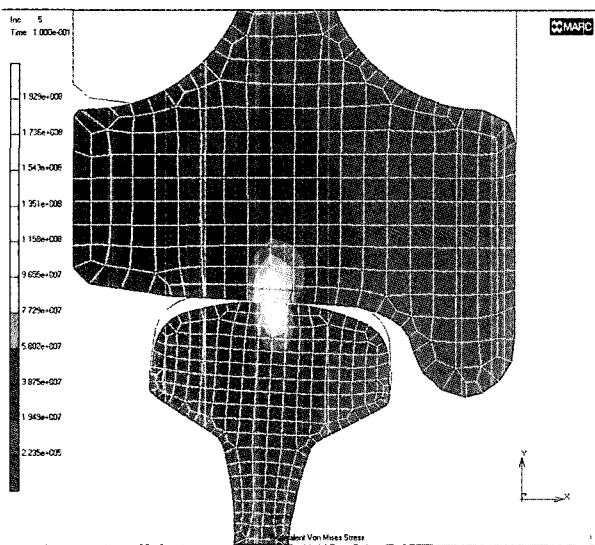
휠의 접촉면 기울기를 2.5%에서 5.5%로 증가하였을 경우, 레일과 휠에 걸리는 응력은 54%와 53%로 각각 대폭적인 증가를 보여준다. 결국, 휠의 접촉면 기울기를 증가시키



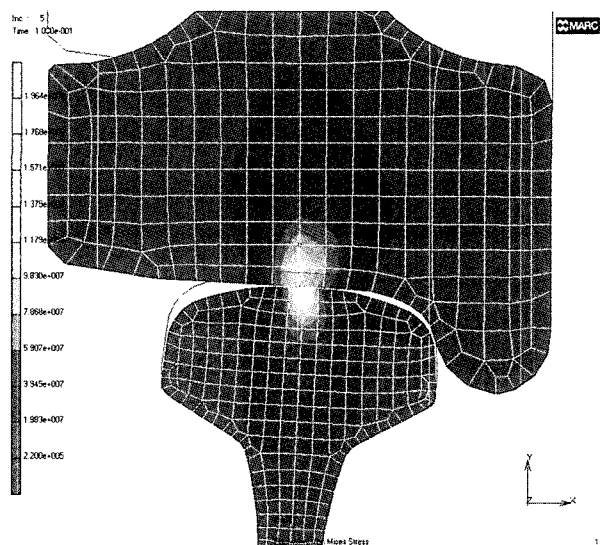
(a) Rail



(a) Rail



(b) Rail - wheel contact



(b) Rail - wheel contact

Fig. 3. von Mises stress distributions on the surface of rail-wheel rolling contact for an inclination of the wheel surface, 2.5% and the tilting ratio of the rail, 20:1

Fig. 4. von Mises stress distributions on the surface of rail-wheel rolling contact for an inclination of the wheel surface, 5.5% and the tilting ratio of the rail, 20:1

면 레일과 휠의 마찰면에 걸리는 접촉응력은 크게 증가하면서 국부적인 마찰열이나 마멸 발생으로 인한 손상과 특히 장기간 사용에 따른 피로에 의한 마멸과 파괴가 예상되므로 적절한 열처리가 필요하다.

Fig. 5는 Fig. 3의 해석결과를 3차원적으로 확대한 결과이다. 레일과 휠의 접촉점에서 von Mises 응력이 국부적으로 각각 집중되고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 국부적인 응력집중 현상은 레일이나 휠에서 미시적으로 발생하는 마멸

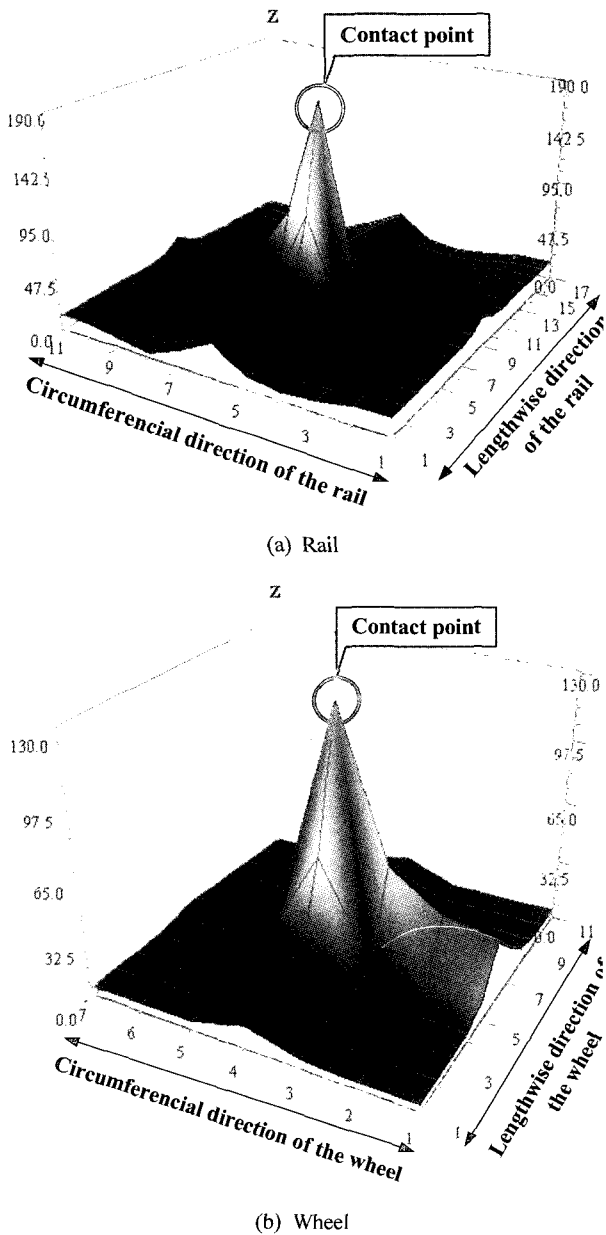


Fig. 5. von Mises stress distributions on the rolling contact surface between the rail and the wheel for an inclination of the wheel surface, 2.5% and the tilting ratio of the rail, 20:1

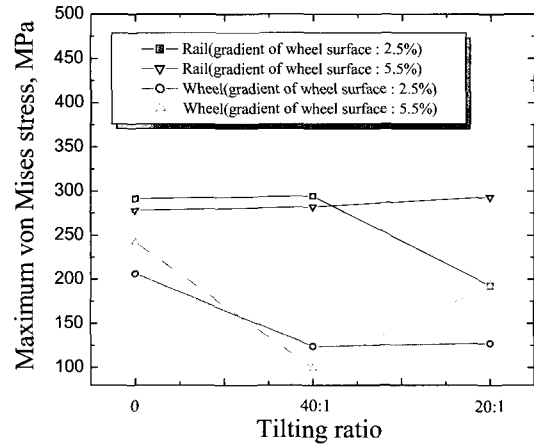


Fig. 6. Maximum von Mises stress as a function of the tilting ratio of the rail for various values of an inclined wheel surface

과 피로파괴의 원인으로 작용할 것이라는 해석결과이다.

Fig. 6은 레일의 경사도가 없는 경우와 있는 두 가지(40:1, 20:1)에 대하여 상대적인 von Mises 데이터를 제시한다. 또한 휠의 마찰 경사면의 기울기는 2.5%와 5.5%의 두가지 모델에 대한 최대 von Mises 응력 해석결과를 보여주고 있다. Fig. 6의 해석결과에 의하면, 레일의 접촉부에 걸리는 접촉응력은 휠의 표면 기울기가 5.5%이고 레일의 기울기가 40:1일 때 가장 낮게 발생하였다. 또한, 휠 표면의 기울기가 2.5%인 경우는 레일의 기울기가 20:1일 때 낮은 최대 von Mises 응력이 발생하였다. 그러나 휠의 표면 기울기가 2.5%이고 레일의 경사도가 20:1인 경우는 두 번째로 양호한 해석결과이지만, 휠과 레일에서 발생한 접촉응력 차이가 가장 작게 나타났다. 이것은 레일과 휠의 접촉응력 상태가 비교적 균일하다는 것을 의미하며, 5.5%와 40:1의 경우보다는 우수한 설계조건이라 생각된다.

Fig. 6에서 제시한 결과처럼 레일과 휠 모두는 일정한 기울기를 갖도록 설계하는 것이 유리하다. 따라서, 레일과 휠의 접촉거동 조건에 가장 적합한 응력거동 특성을 확보하기 위해서는 레일의 모든 형상과 물리적 성질에 적합한 최적화 설계를 수행해야 한다. Fig. 6에서 제시한 모델에 대한 해석 결과는 레일의 경사도를 20:1로 하는 경우는 휠의 마찰 접촉면 기울기를 2.5%로 하는 것이 좋고, 40:1로 하는 경우는 5.5%로 하는 것이 우수한 트라이볼로지 거동특성을 확보할 수 있다.

### 3.2 접촉거동

레일은 침목이나 콘크리트 구조물에 의해 지지되며, 이동하는 철도차량에 의해 레일에 가해지는 하중은 레일의 변형

거동을 일으키는 원인으로 작용한다. 레일은 일정한 경사도를 갖고, 동시에 휠의 구름 마찰면에도 경사진 접촉면을 갖도록 설계하므로 레일의 처짐량이나 좌우측면의 거동특성이 달라진다.

Fig. 7은 레일의 경사면 기울기가 20:1일 때, 휠 표면의 기울기가 2.5%와 5.5%인 두 가지의 접촉모델에 대한 레일과 휠의 접촉거동 분포도를 각각 보여주고 있다. 휠에 가해지는 축하중에 의해 발생하는 최대 변위량은 2.5%와 5.5%의 두 가지 모델이 같은 축하중을 정점에서 받기 때문에 동

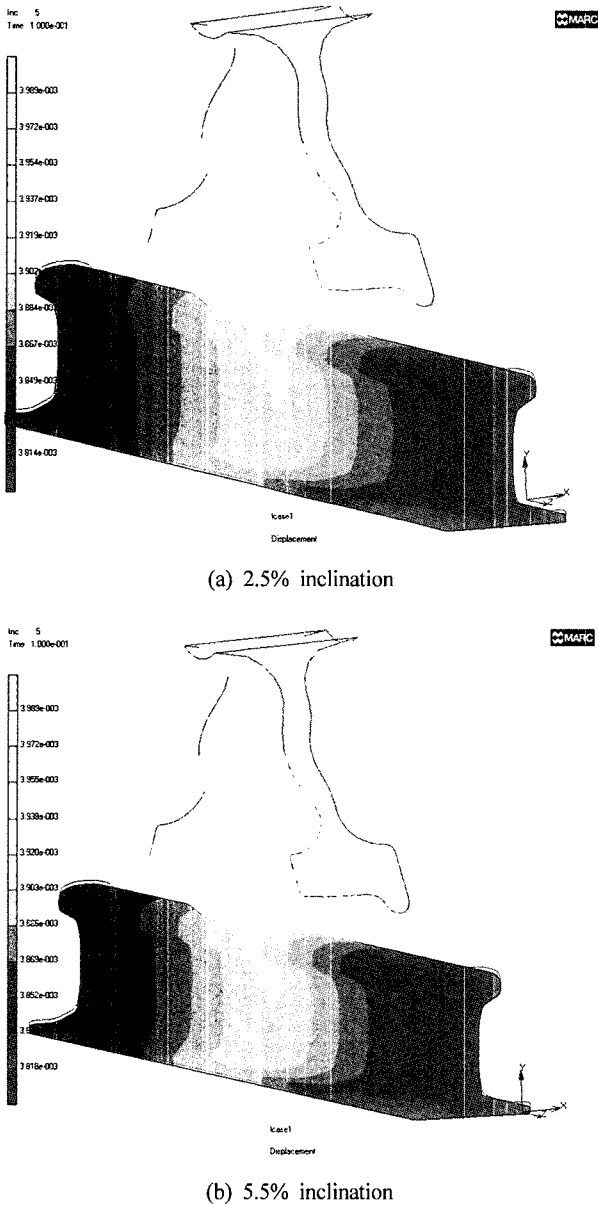


Fig. 7. Displacement distributions on the rolling contact surface between the rail and the wheel with a tilting ratio of the rail, 20:1

일한 변위량을 나타낸다. 그러나 레일에서 발생한 변위량은 휠과 접촉하는 지역에서 가장 큰 처짐량이 발생하였다.

Fig. 8은 휠 표면의 기울기와 레일의 경사도가 달라짐에 따라 레일의 접촉거동 특성을 해석하기 위해 위치를 표시한 그림이다. Fig. 8에서 표시된 레일의 바닥면 네 곳의 위치에서 관찰한 수평방향 변위량과 수직방향 변위량을 Fig. 9와 Fig. 10에서 각각 제시한다.

Fig. 9(a)와 9(b)는 휠 표면의 기울기를 2.5%, 5.5%로 설계하였을 때 레일의 바닥면 모서리에서 발생한 수평방향 변위량을 제시한 결과이다. Fig. 9의 해석결과에서 제시한 것처럼 레일의 기울기가 40:1에서 20:1로 증가하면, 휠 표면의 기울기에 관계없이 변위량 모두가 급격하게 줄어든다. 이것은 레일의 기울기가 증가할수록 수평방향으로 작용하는 분력이 작아지기 때문으로 휠의 접촉면 기울기보다는 레일의 경사도 조건이 보다 큰 영향을 준다. 휠의 기울기가 2.5%인 Fig. 9(a)에서 레일의 경사도가 40:1인 경우는 플랜지가 설치된 쪽(A, B)의 변위량이 크게 발생하는 것이 비하여 20:1인 경우는 플랜지를 설치한 반대편에서 큰 변위량이 발생하고 있음을 알 수 있다.

그러나 Fig. 9(b)의 결과처럼 휠의 경사면 기울기를 5.5%로 증가하는 경우는 레일의 경사도에 관계없이 플랜지 반대측에서 보다 많은 변위량이 발생되고 있다. 따라서, 레일의 경사면 기울기는 40:1보다 20:1로 설치하는 것이 변형거동 측면에서 유리함을 할 수 있다.

Fig. 10은 레일의 수직방향 변위량을 나타낸 결과로, 동일한 휠 표면의 기울기에서 레일의 경사도가 40:1이면 플랜지가 설치된 쪽(A, B)의 처짐량이 커지고, 경사도가 20:1로 증가하면 레일의 좌·우 처짐량이 비슷하게 발생한다. 이것

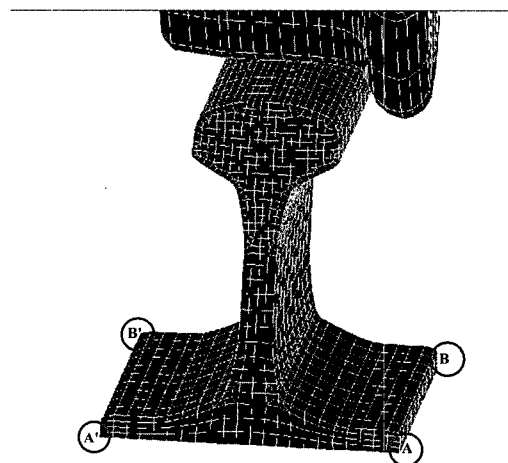
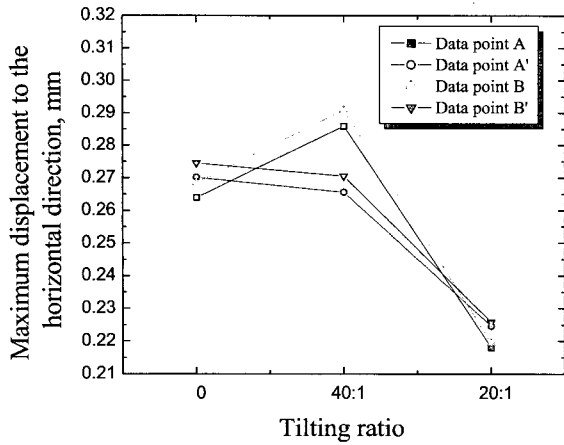
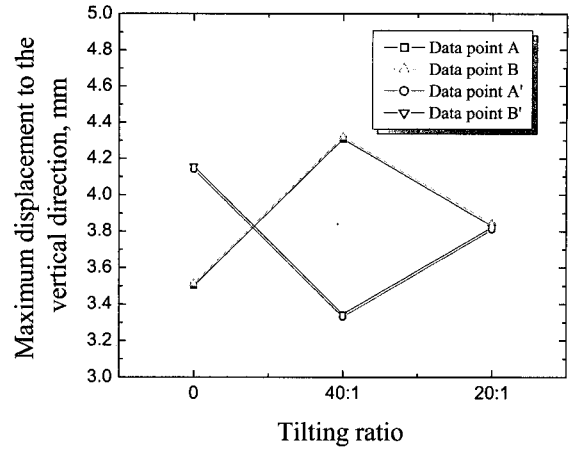


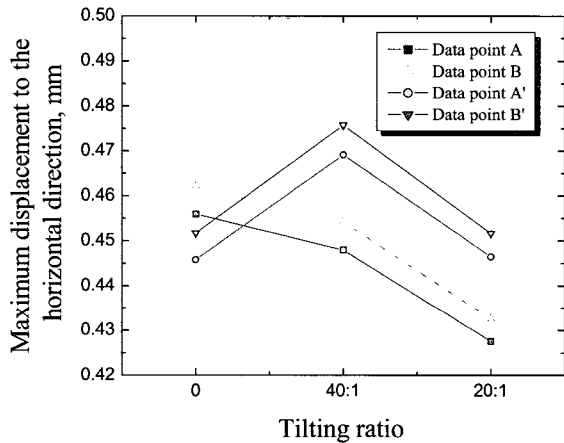
Fig. 8. Observation point of the displacement at the bottom plate of the rail



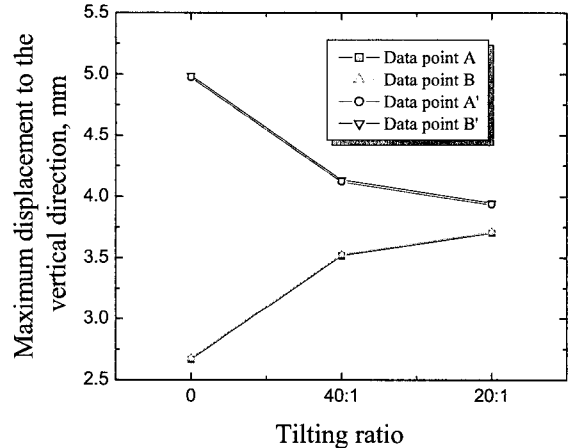
(a) 2.5% inclination



(a) 2.5% inclination



(b) 5.5% inclination



(b) 5.5% inclination

Fig. 9. Maximum displacement to the horizontal direction with an inclination of the wheel surface

Fig. 10. Maximum displacement to the vertical direction with an inclination of the wheel surface

은 레일의 경사도를 20:1로 유지하는 것이 변위량 거동특성에서 보면 대단히 안정되었다는 것을 의미한다. 그러나 레일의 좌·우측 처짐량의 합은 레일의 경사도에 관계없이 일정하다는 사실을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 휠 표면의 기울기가 5.5%인 Fig. 10(b)에서도 유사한 경향을 보여주고 있다. 즉, 레일의 플랜지 측보다는 반대측에서 높은 처짐량을 나타내는 것으로 보아 변위 거동특성이 안정된 20:1을 레일의 경사도로 선정하는 것이 유리함을 알 수 있다.

Fig. 10의 변위량 거동특성에서 제시한 것처럼, 레일의 좌·우측 처짐량의 합은 휠의 표면 기울기에 관계없이 일정하지만 레일의 좌우측 거동특성에서 보면 레일의 기울기는 40:1로 하는 것보다는 20:1로 증가하여 설치하는 것이 보다 안정될 것이라는 해석결과를 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

본 논문은 휠 표면의 기울기와 레일의 경사도를 모두 고려한 레일-휠의 접촉표면 응력과 변위량 거동 특성을 유한 요소법으로 해석하였다.

휠과 레일에서 발생한 von Mises 응력은 레일의 접촉면에서 길이방향으로 길게 좌우로 좁게 발생하였다. 그리고 휠 접촉면의 곡률이 레일의 접촉면에 비하여 크기 때문에 휠보다는 레일에서 53% 이상의 높은 응력이 발생하였다. 이러한 국부적인 응력집중 현상은 레일-휠의 구름 접촉 운동면에 반복하중으로 작용하여 마찰열, 마멸 등을 발생하고, 궁극적으로는 피로손상을 일으키는 원인으로 작용할 것이다.

또한, 휠과 레일에서 발생하는 수평방향의 거동량은 레일의 경사도가 증가할수록 줄어드는 경향을 나타낸다. 그러나,

수직방향의 변위량은 레일의 경사도에 따라 레일의 좌·우측에서 달라지나 좌·우측에서 발생한 변위량의 합은 일정하다. 레일에서 발생하는 변위량 거동특성을 보면, 레일의 경사도에 따른 레일의 좌·우 위치에서 발생한 수직방향의 변위량은 20:1인 경우가 40:1인 경우에 비해 상대적 차이가 작기 때문에 레일의 거동 안전성은 상대적으로 우수하다.

결국, 철도차량의 레일-휠에 관련된 접촉면의 구름마찰 조건에서 레일의 경사도와 휠의 표면 기울기는 중요한 설계 변수라는 사실을 보여준 해석결과이다. 특히 레일과 휠의 기울기를 최적화 설계함으로써 레일-휠의 마찰, 마멸문제를 완화할 수 있고, 레일과 휠의 수명 연장은 물론, 마찰거동 조건에 의한 차량의 진동과 소음조건도 완화시킬 수 있다.

## 참고 문헌

1. Dearden, J., "The Wear of Steel Rails : A Review of the Factors Involved", Proc. Inst. Civil Eng., London, May 1954.
2. Dearden, J., "The Wear of Steel Rails and Tyres in Service", Wear, Vol.3, pp.43-59, 1960.
3. Wise S., "Railway Wheelsets - A Critical Review", Proceeding of the Institute of Mechanical Engineering, 201(D4), 257, 1987.
4. AAR S-660-83, Proceeding for the Analytical Evaluation of Locomotive and Freight Car Wheel Designs, Manual of Standards and Recommended Practices, Mechanical Division, Association of American Railroads, USA, 1983.
5. Jergeus J., "Wheel/Rail Contact Problem Modelled with Three Dimensional Finite Elements in a Supercomputer", Chalmers Univ. of Tech., Report T125, 1991.
6. Report of Railway Engineering Research at Chalmers University in Gothenburg, Proceedings of the Institute of Mechanical Engineering, 206, 145, 1992.
7. Chung Kyun Kim, etc., "Tribological Approach on the Stress Distribution of Wheel-Rail Contact", Proceeding of the KSTLE, Vol.25, pp.210-217, 1997.
8. Kasy Aiyar S., "Some Aspects of the Problem of Rail-Wheel Intersection", Research Design and Standards Organization, Technical Report No.345, India, 1976.
9. MARC Analysis, Ver. 7.0, 1999.